

視覚情報をもつカニ型ロボットの歩行運動制御

朝倉 俊行* 猪飼 佳久**

Walking Motion Control of Crab Type Robot with Vision Information

Toshiyuki ASAKURA* and Yoshihisa IKAI**

(Received February 20, 2004)

In this research, the crab type robot based on the model of crab is treated. That is, the purpose is to develop the crab type robot, which is able to walk in various road surfaces. I have produced the crab type robot carrying the USB camera of the 6 legs robots. When a crab type robot walks to the destination, it is necessary to take in the information on surrounding environment by the sensor, and to recognize what environment it is. Then, I carried the USB PC camera in the crab type robot as vision information. It looked for the marker using GA, distance was measured, and the orbit of the leg point was generated to move distance. On the other hand, when the obstacle which cannot be overcome on a mechanism was discovered, the creation of a detour course is taken to avoid an obstacle. I checked the usefulness of the proposed technique by experiment. From the above thing, I created the crab type robot which can walk on real time in various environments.

Key Words : Crab Type Robot, Genetic Algorithm, 6-Legged Walking Robot, Vision Information

1. 緒 言

近年、ロボットは様々な場所での利用が期待されており、惑星探査や地雷撤去、あるいはレスキュー活動などの分野において積極的な導入が検討されている。このような分野ではロボットが作業しやすいように環境を整備することは困難である。そのため様々な環境に適応できるロボット、未知の環境においても行動のできるロボットが必要とされている。様々な環境への適応性という面からみれば、脚移動は階段などの凹凸路面の移動や接地点を選択しながらの離散的な移動が可能であるため優れた移動方法であると考えられる。脚式移動ロボットの研究は、2脚、4脚、6脚、そしてマイクロ歩行ロボットと多岐にわたって展開されている。その中でも6脚式ロボットは静歩行が容易で安定

性が良く実作業に適しているため、様々な研究がなされている。

そこで本研究では岩場や砂浜、波打際などの歩行に困難な環境で進化してきたカニ固有の特徴である“横歩き”に着目し、カニをモデルとした6脚式ロボットの歩行について研究し、未知なる環境でも柔軟に歩行が可能な自律型のカニ型ロボットの開発を目指す。

まず、カニ型ロボットを目的地まで歩行させるのに、環境認識のためのセンサとして、USB PCカメラを搭載した。目的地に目標物を置き、生物の遺伝と進化にヒントを得た遺伝的アルゴリズム(GA)を用い、目標物のマーカを探索し、目標物までの距離を測定した。また、その距離情報を元に脚先の軌道生成法を提案し、段差や坂道、波状路面、人工芝などの不整地路面での歩行実験を行い、その有用性を確認した。また機構上、乗り越えられない障害物が存在する場合の迂回方法についても、その有用性を確認した。

2. カニ型ロボットの概要

カニの脚は左右それぞれ4本ずつ計8本であるが、カニの歩行を観察すると、主に第1脚から第3脚の6本の脚を巧みに使用し第1脚と第3脚は歩行中ほぼ同

*知能システム工学科

**大学院工学研究科機械工学専攻

*Dept. of Human and Artificial Intelligent Systems

**Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

動きをしている。さらに1本の脚に注目すると、歩行に深く関係しているのは付け根の関節と第1関節のみである(Fig.1)。

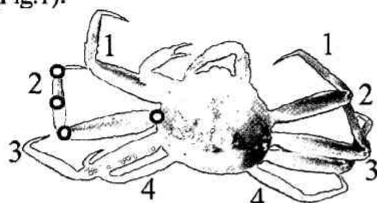


Fig.1 Form of a crab

そこで本研究では2リンクで左右第1脚から第3脚の6本の脚から成る6脚式のカニ型ロボット^[1]を想定した。Fig.2はカニ型ロボットの実機であり、各関節の駆動はラジコン用サーボモータを用いた。衝撃を受けモータの故障の原因となるモータの脚への配置やモータのトルクの制約を満足させるためにモータの胴体への配置が望ましい。そこで、全モータの胴体への搭載を試みたが、モータのサイズやスペース上の問題から同一面でのモータの配置は難しく、上段に第1,3脚と下段に第2脚を配置し、脚を上下二段に配置した。また、6脚で各2関節の機構で進行方向と上下動の2次元的な動きであるので、上段と下段の間にモータを配置し転回の要素を取り入れ、3次元的な動きを可能とした。

RCサーボモータは、RS232Cを介して制御が可能な浅草ギ研のシリアルサーボコントローラ2(SSC2)にてPCで操作を行った(Fig.2)。

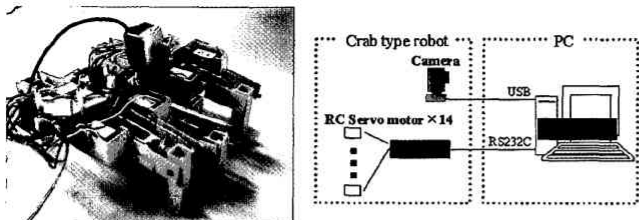


Fig.2 Composition of a camera and a motor

カメラは一定倍率のUSB PCカメラ(30万画素)を用いた。ここで用いたUSB PCカメラの視野は約37[deg]と狭いため、カメラにモータを設置しFig.3のように①正面→②→③・・・→⑦と順に30[deg]ずつカメラを回転させ、カニ型ロボット自体は固定のまま217[deg]の範囲を見渡すことが可能になり、目標物の探索が可能

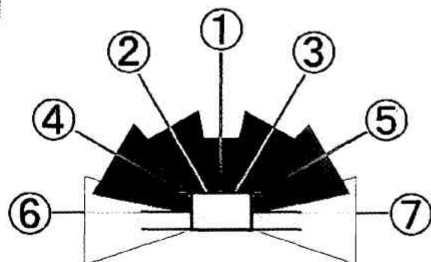


Fig.3 Motion of camera

3. GAを用いた対象物探索

環境認識のためのセンサとして搭載したUSB PCカメラにより、目的地に置いた目標物のマーカー(20×20[mm²])を探索し、探索したマーカーの大きさにより距離を求める。また、障害物のマーカーは両端を赤色(幅20[mm])、その間を黒色とし、障害物のマーカーの高さと位置を求める。Fig.4に目標物と障害物の形状と寸法を示し、以下にその手法を記述する。

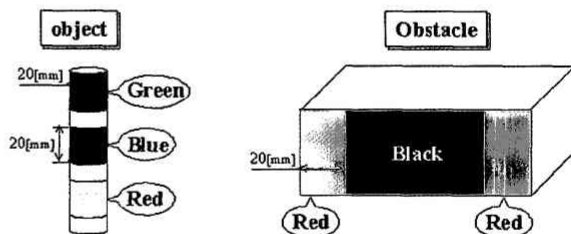


Fig.4 Marker of object and obstacle

3.1 RGB表色系による2値化処理

USB PCカメラからの画像を、24Bit Pixel Formatのビットマップ画像に変換し、ひとつひとつのピクセルに対し光の3原色である赤、緑、青の混合度の割合から、任意の色を空間座標にする方法であるRGB表色系を用い、R(赤)値、G(緑)値、B(青)値を抽出して下に示す(1)～(4)の条件式にて2値化を行なった^[2]。ここで黒色の抽出は式(4)のような条件式を用いる。Fig.5にその抽出画像を示す。

【赤色の抽出】

$$2 \times R - (G + B) > 120 \quad \& \quad R > G \quad \& \quad R > B \dots (1)$$

【緑色の抽出】

$$2 \times G - (R + B) > 90 \quad \& \quad G > R \quad \& \quad G > B \dots (2)$$

【青色の抽出】

$$2 \times B - (R + G) > 90 \quad \& \quad B > R \quad \& \quad B > G \dots (3)$$

【黒色の抽出】

$$R = G = B < 100 \quad \& \quad |R - G| < 25 \quad \& \quad |R - B| < 25 \\ \quad \& \quad |G - B| < 25 \dots (4)$$

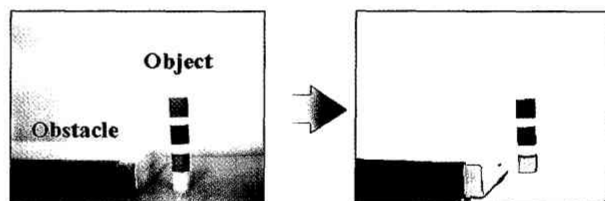


Fig.5 24bit pixel format bmp image and extracted image

3.2 GAによるマーカーの探索

GAを用いモデルマッチングによる探索^[3]を行い、マーカーの大きさを求める。ここで、モデルマッチングに用いた探索モデルは、Fig.6に示すように探索精度の向上を図るため2重構造とした。目標物は一辺につき9

個, 合計 72 個の構成点を取り, 障害物は縦 6 個, 横 3 個, 合計 36 個の構成点を取った. ここで, 内側と外側の隙間 ($space_1$, $space_2$) は対象画像の大きさにより変化させ探索精度を高めた. また, 目標物のマーカーに対し, 障害物のマーカーは高さが一定ではないので内側と外側の隙間 ($space_2$) を大きくとる. $space_1$ と $space_2$ をそれぞれ, 式 (5), 式 (6) に示す. ここで $size$ は定数でありマーカーの大きさを示す値である.

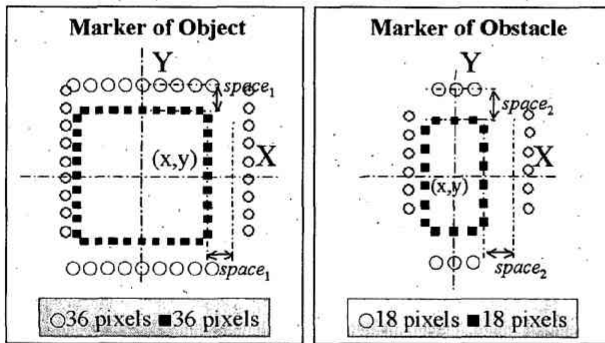


Fig.6 Search model of object and obstacle

$$space_1 = 5 + size_1 / 10 \dots \dots \dots (5)$$

$$space_2 = 10 + size_2 \dots \dots \dots (6)$$

$$(size_1: 1 \sim 50, size_2: 10 \sim 70)$$

内側のモデルは対象画像上に, 外側のモデルは対象画像の外側を囲むように配置された時に, 適応度が最大となるように設定した. すなわち, Fig.6における内側の構成点である■の輝度値が1の場合, または, 外側の構成点である○の輝度値が0の場合, それぞれの構成点の評価を1とし, 全構成点のうち評価が1の構成点の割合を評価関数とした. 適応度の評価関数を式 (7) に示す.

$$fitness = \frac{\sum (M_{in} + M_{out})}{n} \dots \dots \dots (7)$$

n : 構成点の総数

M_{in} : 内側構成点の評価 (輝度値 1 → 評価 1)

M_{out} : 外側構成点の評価 (輝度値 0 → 評価 1)

3.3 遺伝子の構成

Fig.7 に示すように各個体の遺伝子型を G_k とし, 探索モデルの中心座標とモデルの大きさ (拡大率) から成っており, 各個体の遺伝子型と各パラメータの範囲を示す. 画像全体の大きさは 320×240 [pixel] であるので, 画像 X 方向 (横方向) の探索領域 x_k は $0 \sim 320$ [pixel] となるため 9 ビットで表現できる範囲 ($2^9: 0 \sim 511$) とし, 画像 Y 方向 (縦方向) の探索領域 y_k は $0 \sim 240$ [pixel] となるため 8 ビットで表現できる範囲 ($2^8: 0 \sim 255$) とした. また, マーカーの大きさは距離によって変化

するので, モデルはある程度の拡大率がないと目標物までの距離に限られた小範囲になってしまう. そこで画像領域に対し, 十分な大きさが表現できる 6 ビットとし, モデルの拡大率 M_k は $0 \sim 63$ とする. また GA のパラメータは, 次の通りである. 個体数: 20, 淘汰率: 0.5, 突然変異率 0.15, 目標物の世代交代数: 500, 障害物の世代交代数: 1000

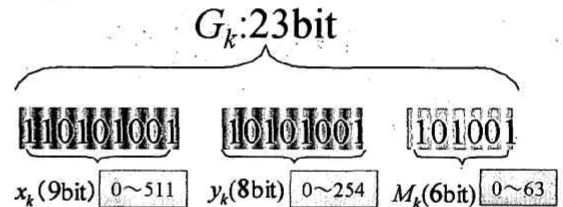


Fig.7 Genotype of model

3.3 距離の測定

RGB 表色系を用い抽出したマーカーの大きさ (ピクセル数) で距離を求める. ところが, 抽出するマーカーにより同じ距離であってもピクセル数が異なる場合がある. そこで, 青色, 緑色, 2 色のマーカー (20×20 [mm²]) のピクセル数の平均値を $100 \sim 1000$ [mm] の距離で測定し, カメラからの距離とピクセル数の関係を実験的に求めた (Fig.8).

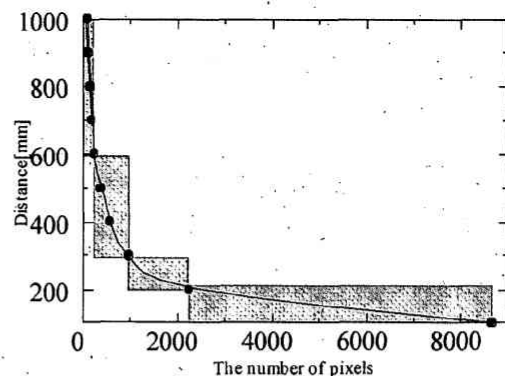


Fig.8 Relation between number of pixels and distance

Fig.8 に示す様にピクセル数に対してカメラからマーカーまでの距離を算出する計算式を 4 つにわけ, 近似式を最小自乗法を用いて 3 次以下の式で作成した. また, 障害物はマーカーの横幅のピクセル数で距離, 縦のピクセル数で高さの算出を行った.

3.4 探索カラーの選択

マーカーを探索する際, 計算量を低減し高速化を図るため, 画面全体ではなく必要な領域のみに個体を生成する. つまり抽出カラー上に, 探索モデルの中心が存在するように初期個体を生成している. ところが, このような方法とマーカーの広範囲な拡大率を組み合わせるため, 外乱が多い場合, 誤認識をする確

率が高くなりマーカの認識に大きな支障が出てしまう。そこで Fig.9 のように外乱に青色が多い場合は探索カラーを緑色、外乱に緑色が多い場合には探索カラーを青色とした。

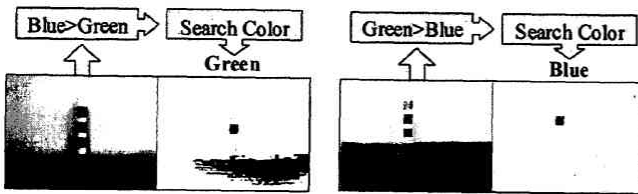


Fig.9 Selection of search color

4. 歩容の生成

4.1 歩行パターン(歩容)

多脚歩行ロボットの歩容は、1 周期の歩行の中で脚が接地している時間の比率であるデューティ比 $\beta=1/2$ の歩容が胴体の最大推進速度を得る歩容となる^[4]。つまり 6 脚式であるカニ型ロボットは静歩行で最大移動速度が実現できる。そこで、安定余裕を最大にするデューティ比 $\beta=1/2$ の歩容である左 1 脚と右 2 脚、左 2 脚と右 1 脚の 3 脚での三角形支持を交互に繰り返すトライポッド歩容を採用する。ここで、カニ型ロボットと目的地の間が平坦であればよいが段差や坂道などの障害物がある場合、目的地までの到達が不可能であったり、スムーズに歩行することが不可能であったりする。そこで段差や坂道など障害物がある場合の歩容を考慮しなければならない。

段差に引っ掛った場合には、移動距離が 0 以下になる。そこで段差乗り越えには、ただ脚を高く上げるだけではなく、支持脚で胴体を高く上げ、段差壁面への接触を回避する必要がある(Fig.10)。

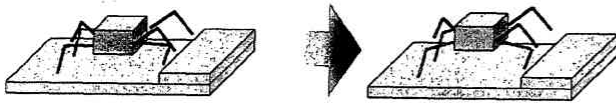


Fig.10 Gait of step

坂道では移動距離が減少する。また、人は坂道を歩くとき、胴体を坂道に対してではなく鉛直方向に垂直になるように歩行する。そこでカニ型ロボットも胴体を鉛直方向に対し垂直にして歩行した方が安定した歩行ができると考えられる(Fig.11)。

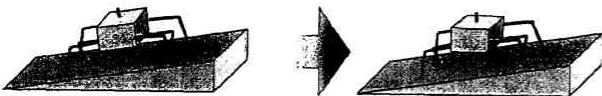


Fig.11 Gait of slope

4.2 軌道生成法

平面から路面形状が変化する場合、1 歩毎(半周期毎)

の移動距離は変化する。そこで、半周期毎の移動距離により脚先の軌道形状を決定する方法を提案した。

Fig.12 は、入力距離と出力距離を表しており、横軸は入力であるカメラからの測定距離[mm]、縦軸は次の半周期に出力する脚先軌道の幅(Wide)、高さ(High1)、Position1 と Position2 の高さの差(High2)である。ここで Fig.12 のグラフの横軸の範囲外であるカメラからの測定距離[mm]が 50[mm]以上の場合は Wide=50[mm]、High1=30[mm]、High2=10[mm]をとり、-10[mm]以下の場合は Wide=30[mm]、High1=50[mm]、High2=10[mm]の値をとるものとする。また動き始めの半周期は Fig.13 の破線のように Wide=40[mm]、High1=30[mm]、High2=0 の軌道を取るものとし、形成される軌道は第一歩目の軌道の中心点を基準に形成する。

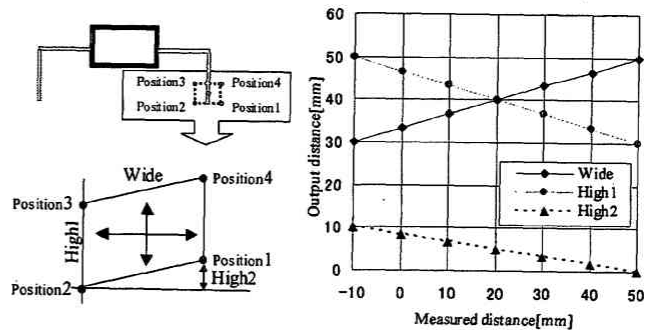


Fig.12 Measurement distance and output distance

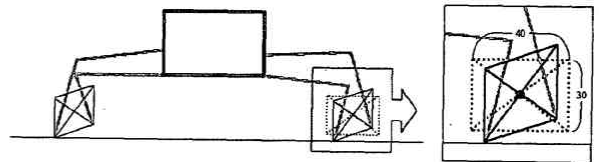


Fig.13 Position of the formed orbit

そして、求めた軌道に対し、底辺 40 等分、縦 10 等分、上辺 20 等分の合計 80 個の点を取り逆運動学を用い各関節の角度を求め、モータに信号を送る。各関節は式(8)(9)に示す様に表され、各記号は Fig.14 に表す。

$$b_2 = \cos^{-1}((R_1^2 + R_2^2 - R^2)/(2R_1 \times R_2)) \dots \dots \dots (8)$$

$$b_1 = \cos^{-1}((R_1^2 + R^2 - R_2^2)/(2R_1 \times R)) + c \dots \dots \dots (9)$$

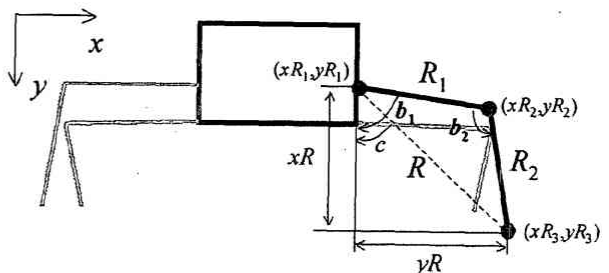


Fig.14 Reverse kinematics

4.3 転回

マーカーがカメラ画像に映っていない場合やカメラ画像から外れてしまった場合、カニ型ロボットの進行方向を補正してマーカーを見失わないようにする必要がある。以下に転回方法と転回量について記述する。転回方法は、上段の脚での4脚支持と下段の脚での2脚支持を繰り返し、2脚支持の状態の際に上下間に搭載したモータを回転させ胴体を転回させる。

また転回量は、マーカーをカメラの映像の中心に持っていくように決定する。つまり Fig.15 で x_1 だけ変化するように転回させる。まず、カメラの映像(320×240[pixel])から探索されたマーカーと中心までのピクセル数 x_1 を算出する。 x_1 の実際の大きさ ($|x_1|$) はカメラからマーカーまでの距離 (y) によって変化するので、カメラからの距離 (y) とカメラの映像の横幅の長さ (D) の関係を実験的に求めた。これにより x_1 の実際の大きさである $|x_1|$ が式 (10) のように求まり、転回量 (θ) を式 (11) のように求めることができる。

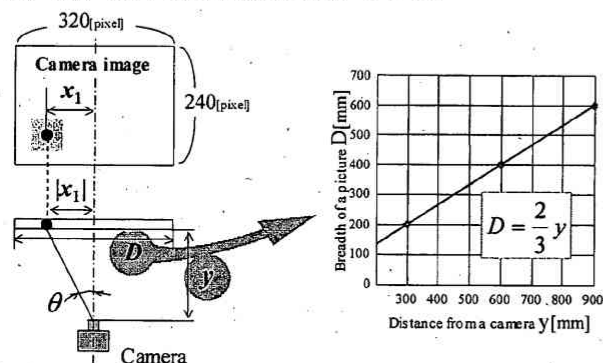


Fig.15 Amount of revolution

$$|x_1| = \frac{x_1}{320} \times D \dots (10) \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{|x_1|}{y} \right) \dots (11)$$

4.4 障害物の回避

カニ型ロボットが障害物を発見した際、形状を認識し機構上乗り越えが不可能であると判断した場合、障害物を回避するよう旋回して迂回しなければならない。

迂回方法の説明を右に迂回する場合を例に行う。マーカーを探索し発見した際、Fig.16 の Image1 のように進行方向に乗り越えられないような障害物が存在すれば、転回→歩行→転回...を繰り返し、マーカーを見失わないようにマーカーを中心に旋回を行う。そして、Fig.16 の Image2 のように障害物がカメラの映像から外れたら方向転換して歩行を開始する。

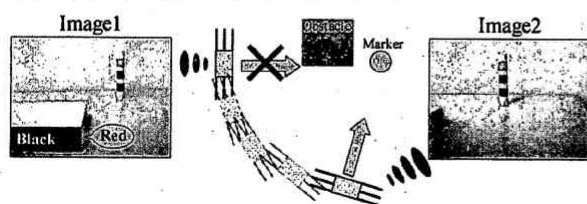


Fig.16 Detour method

5. 歩行運動実験

作成したカニ型ロボットで、上述の画像処理と脚先の軌道生成法を用い、不整地路面の歩行実験と障害物の迂回実験を行う。各実験の手順を Fig.17 のフローチャートに示す。Flowchart2 は Flowchart1 の着色部の前の手順に相当する。

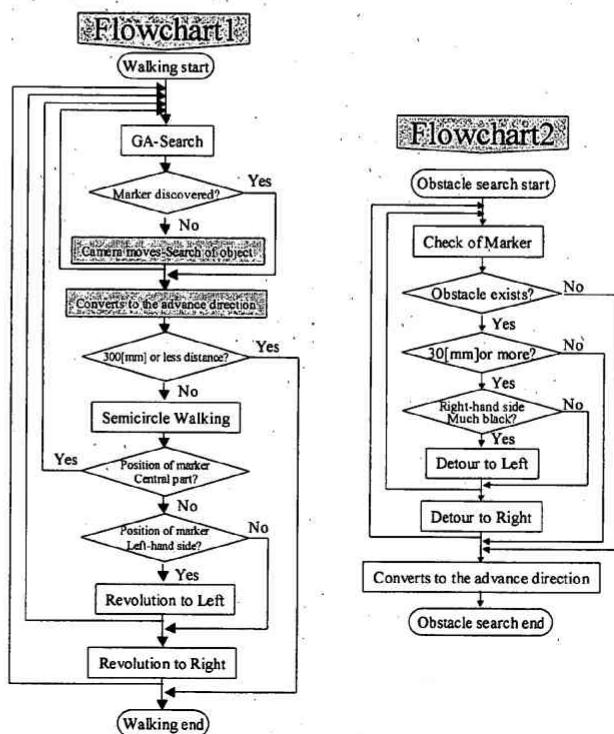


Fig.17 Algorithm of walking and detour

5.1 不整地路面の歩行実験

出発地点と目的地の間に段差や坂道が存在する場合や路面形状が波状や人工芝のような不整地での歩行実験を行い、提案した手法の有用性を確認する。実験を行った路面形状は Fig.18 に示すように 10 通りであり、段差、坂道、波状路面などの障害物の寸法を Fig.18 に示す。①平面、②段差-降り、③坂-下り、④段差-登り、⑤坂-上り、⑥横波状路面、⑦縦波状路面、⑧人工芝-平面、⑨人工芝-段差、⑩人工芝-坂

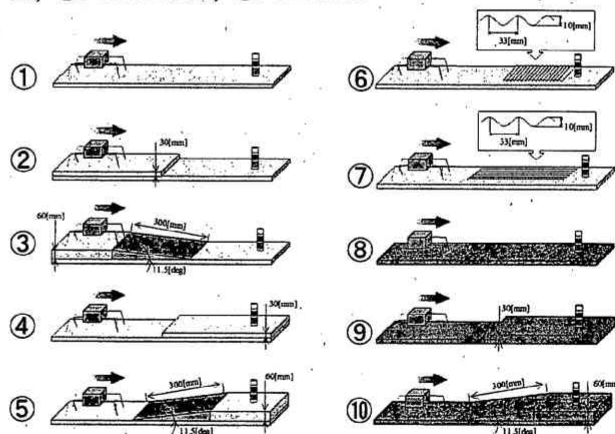


Fig.18 Road form of experiment

実験では途中で障害物に接触した場合でも、カニ型ロボットの移動距離に応じて脚先の軌道を生成し、次周期で障害物を乗り越えに成功した。また、重心などのずれで、搭載したカメラの映像からマーカが外れそうになった場合は、転回し進行方向を補正することで、目的地まで到達することができた。Fig.19 に④段差・登り、⑩人工芝・坂のカニ型ロボットの様子と搭載したUSB PC カメラからの探索画像を示す。

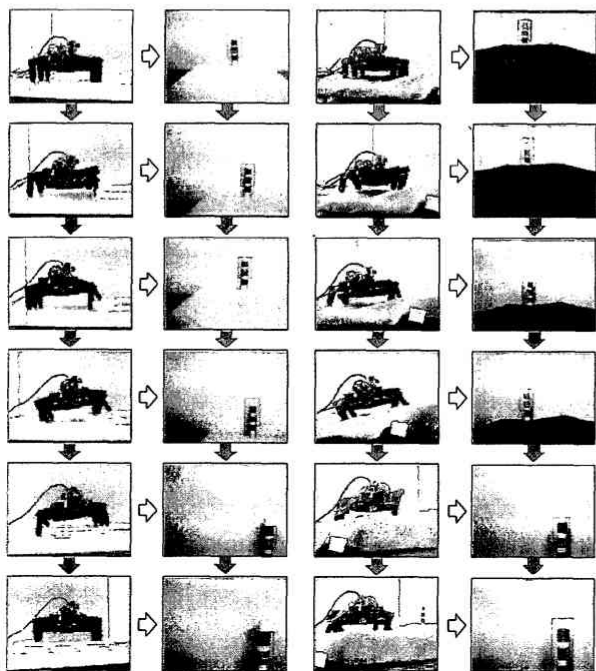


Fig.19 Walking of ① and ②

5.2 障害物迂回実験

カニ型ロボットが機構上、乗り越えられない障害物を発見した場合、障害物を避けるように旋回して迂回しなければならない。そこで Fig.20 に示すような環境で、高さ 35[mm]の障害物を出発地点から 500[mm]の位置に設置し、迂回して障害物を回避する実験を行った。

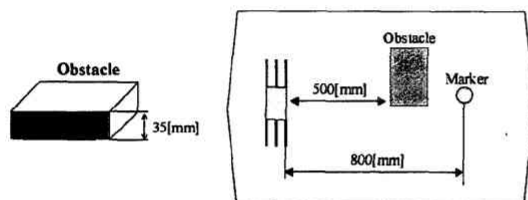


Fig.20 Experiment evasion of obstacle

実験の様子を Fig.21 に示す。まず、障害物のマーカを探索し、高さを測定して機構的に乗り越えられないと判断した。また、黒色部分を検出し、左側に障害物が存在すると判断し、それを避けるように転回→歩行→転回…を繰り返し、右に迂回をした。障害物を探索画面から外して回避し、進行方向を向いて目標物に向かって歩行を行った。

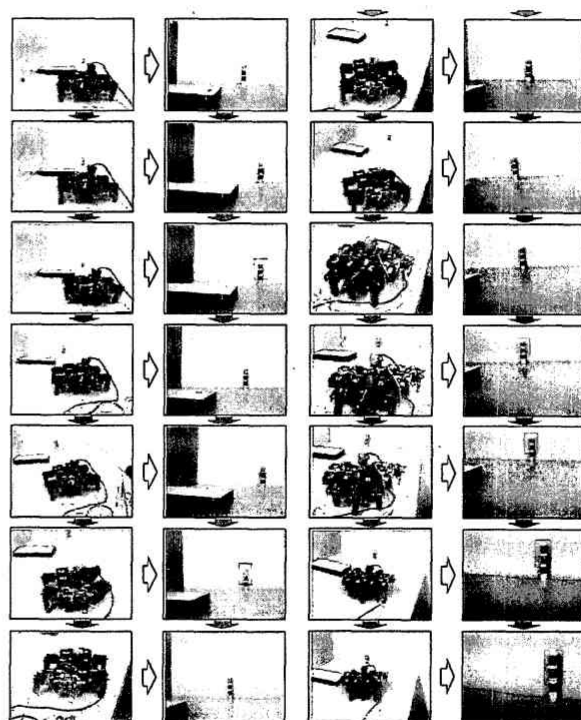


Fig.21 Experiment which avoids an obstacle

6. 結 言

カニ固有の特徴である“横歩き”に着目し、環境認識のためのセンサとして USB PC カメラを搭載したカニをモデルとした 6 脚式のカニ型ロボットを作成した。搭載したカメラからの画像を、RGB 表色系を用い 2 値化処理を行い、GA を用いて目標物であるマーカの探索を行い、距離の測定を行った。そして、距離情報を用いた脚先の軌道生成法を提案し、不整地での歩行運動実験を行い、その有用性を確認した。また、機構上乗り越えが不可能な障害物を発見した場合、障害物を避けるように旋回して迂回する方法を提案した。

以上の結果から段差・坂道・波状路面・人工芝のような不整地路面や機構上乗り越えられない障害物が存在する場合でも、目標物に対しリアルタイムで歩行のできるカニ型ロボットを実現した。

参考文献

- [1] T. Shimizu, T. Asakura, “Study on Walking Posture of Crab Type Robot using Genetic Algorithm”, Dynamic Systems Approach for Embodiment and Sociality, 428-434(2002)
- [2] Shigeru Yoshida, Toshiyuki Asakura “Piled up control of cylinder block by mobile arm robot using image recognition” SICE 2002, (p102,TA17-3)
- [3] 安居院猛, 長尾智晴, “ジェネティックアルゴリズム”, (1993), 昭晃堂
- [4] 小谷内範穂 “多足歩行ロボットの世界” “日本ロボット学会誌 Vol.11 No.379~384 (1993)